

**О. В. КРАХМАЛЬОВ, О. І. ЗІНЧЕНКО, Г. А. КРОТЕНКО**

### **ЕЛЕКТРОДИ ДЛЯ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ, ЯКІ ВИГОТОВЛЕНІ З ЛИТИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ МІДІ**

При контактному зварюванні потрібно, щоб електрод мав високу електропровідність, але не був дуже пластичним. Використання для виготовлення електродів чистої міді проблеми не вирішує, оскільки вона має високу пластичність. Мідь має полікристалічну будову. При деформуванні міді спостерігається роздроблення та подовження окремих зерен і відбувається певна їх орієнтація. Чистота міді впливає як на її властивості, так і на подальшу механічну обробку. Домішки і добавки різко знижують електропровідність і теплопровідність міді. Для виготовлення електродів доцільно застосовувати металічні системи на основі сплавів міді з обмеженою взаємною розчинністю компонентів у рідкому стані, здатних зберігати високі показники механічних і тепло-електрофізичних властивостей при підвищених температурах, у яких зміцнюючі дисперсні включення формуються безпосередньо в розплаві.

**Ключові слова:** мідь; електрод; сплав; домішки; легування; хімічний елемент; властивості

**А. В. КРАХМАЛЕВ, Е. И. ЗИНЧЕНКО, Г. А. КРОТЕНКО**

### **ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ ИЗ ЛИТЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ**

При контактной сварке необходимо, чтобы материал электрода имел высокую электропроводность, но не был слишком пластичным. Применение для изготовления электродов чистой меди проблему не решает, поскольку она имеет высокую пластичность. Медь имеет поликристаллическую структуру. При деформации меди происходит раздробление и удлинение отдельных зерен и их определенная ориентация. Чистота меди влияет как на ее свойства, так и на дальнейшую механическую обработку. Примеси и добавки резко понижают электропроводность и теплопроводность меди. Для изготовления электродов целесообразно применять металлические системы на основе сплавов меди с ограниченным взаимодействием растворимости компонентов в жидком состоянии, способных сохранять высокие показатели механических и теплоэлектрофизических свойств при повышенных температурах, в которых укрепляющие дисперсные включения формируются непосредственно в расплаве.

**Ключевые слова:** медь, электрод, сплав, примеси, легирование, химический элемент, свойства.

**O. KRAKHMALYOV, O. ZINCHENKO, G. KROTENKO**

### **CONTROL WELDING ELECTRODES MADE OF COPPER-BASED CAST ALLOYS**

In contact welding it is necessary that an electrode material has high electrical conductivity, but is not too ductile. The use of pure copper for the manufacture of electrodes does not solve the problem, since it has high ductility. Copper has a polycrystalline structure. During deformation of copper, fragmentation and elongation of individual grains and their definite orientation occur. The purity of copper affects both its properties and further machining. Impurities and additives sharply reduce the electrical conductivity and thermal conductivity of copper. For the manufacture of electrodes, it is advisable to use metal systems based on copper alloys with a limited interaction of components solubility in the liquid state, capable of maintaining high indices of mechanical and thermoelectrophysical properties at elevated temperatures, in which reinforcing dispersed inclusions form directly in the melt.

**Keywords:** copper, electrode, alloy, impurities, alloying, chemical element, properties.

**Вступ.** Створено багато спеціальних матеріалів, які мають високу тепло- і електропровідність у поєднанні з високими показниками механічних властивостей при підвищених температурах, проте їх рівень не завжди відповідає поставленим вимогам. При контактному зварюванні є певна проблема: потрібно, щоб матеріал електроду мав високу електропровідність, але не був дуже пластичним. Використання для виготовлення електродів чистої міді М0 (99,93% міді) та М1 (99,9% міді) по ДСТУ 859-2001 проблеми не вирішує – вказані марки міді характеризуються високим ступенем пластичності. Як будь-який технічний метал, мідь має полікристалічну будову. При деформуванні міді спостерігається роздрібнення та подовження окремих зерен і відбувається певна їх орієнтація.

**Метою даної роботи** є дослідження нового матеріалу для електродів контактних машин, який би мав високу електропровідність та зносостійкість, а також аналіз доцільності застосування металічних систем на основі сплавів міді з обмеженою взаємною розчинністю компонентів у рідкому стані.

**Аналіз літератури.** У роботі [1] вибрано склад та розроблено порошкову технологію отримання дисперсно-твердіючих бронз для електродів

контактного зварювання систем Cu–Ni–Si, Cu–Co–Si; досліджено механічні властивості та гарячу твердість отриманих матеріалів при температурах 20 – 600°C та доведено, що зносостійкість отриманих матеріалів при зварюванні суттєво перевищує таку відомих зварювальних бронз БрНХК та БрХН6Цр.

З використанням методу реакційного механічного легування виготовляють електродні наноконпозиційні матеріали на основі порошкової міді з електропровідністю більше 85% ІАСС і температурою рекристалізації вище 800°C, ефективність застосування яких в електродах підтверджено результатами порівняльних виробничих випробувань при контактному точковому зварюванні оцинкованих сталей [2].

Параметри плазми електродугового розряду між композитними електродами Cu – С досліджено в роботі [3]. На основі результатів металографічних досліджень поверхні запропоновано механізм руйнування електродів.

Процес дифузійного зварювання у вакуумі міді з молібденом через модифіковані іонним оброб-

© О. В. Крахмальов, О. І. Зінченко, Г. А. Кротенко 2019

ленням прошарки розглянуто в роботі [4]. За допомогою методу радіоактивних ізотопів визначені особливості дифузійної взаємодії міді з молібденом. Показано, що змінюючи основні параметри режиму іонного оброблення поверхневого шару зварного матеріалу, можна суттєво впливати на розміри зони взаємодії та механічні властивості зварного з'єднання.

У роботі [5] досліджено вплив умов спікання механоактивованих в високоенергетичному млині порошків на основі сплаву  $\text{Cu} - \text{Ti} - \text{Al}$  на їх технологічні властивості і морфологію. Показано, що технологічна схема, яка включає пресування при 200 МПа, спікання у водні при температурі 800°C 1 год, допресовку при 700 МПа і спікання при 950°C, дозволяє отримати зразки з відносною пористістю до 6%. В результаті спікання утворюється твердий розчин на основі міді з включеннями оксидів титану. Проведено порівняльний аналіз факторів форми та розміру частинок порошків сплавів  $\text{Cu} - \text{S}$  та  $\text{Cu} - \text{P}$ , одержаних з використанням порошку міді марки ПМС-1. Визначено фактори круглості, компактності, подовженості, порізаності та середній діаметр Фере порошків чистої міді та сплавів. Показано, що завдяки використанню вихідного порошку з високою формованістю, середньотемпературному пічному синтезу та низькоенергетичним методам подрібнення продуктів синтезу навіть при частковому оплавленні та зміні форми частинок вдалось одержати порошки сплавів  $\text{Cu} - \text{S}$  та  $\text{Cu} - \text{P}$ , що мали високу формованість. У процесі синтезу та подальшого подрібнення синтезованого продукту відбувалося часткове руйнування дендритної структури вихідного порошку, про що свідчить зменшення середнього діаметра Фере ( $\text{Cu} - 44,8$  мкм,  $\text{Cu} - \text{S} - 9,5$  мкм,  $\text{Cu} - \text{P} - 12,2$  мкм) [6].

**Основна частина.** Чистота міді впливає як на її властивості, так і на подальшу механічну обробку [7–10]. Багато домішок і добавок навіть в зовсім незначних кількостях різко знижують електропровідність і теплопровідність міді, а також погіршують її здатність до обробки тиском. Залежно від характеру взаємодії з міддю всі домішки умовно можна поділити на три групи [9].

До першої групи належать елементи, які розчинюються в твердій міді ( $\text{Al}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Au}$ ,  $\text{Pt}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Sb}$ ). Другу групу складають елементи, практично не розчинні міді та які утворюють з нею легкоплавкі евтектики ( $\text{Pb}$ ,  $\text{Bi}$  та ін.). До третьої групи належать елементи, які утворюють з міддю крихкі хімічні з'єднання ( $\text{S}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{P}$  та ін.).

Розчинні елементи при малих концентраціях не можуть бути виявленими під мікроскопом, оскільки вони входять у твердий розчин. Ці домішки у припустимих межах практично не зменшують здатності міді до пластичної деформації. У більшості випадків домішки цих елементів підвищують її твердість і міцність, знижують електро- і теплопровідність. Нерозчинні домішки (свинець і вісмут) утворюють з міддю евтектики, які складаються майже із чистих металів (вміст вісмуту в евтектиці 99,8%, а свинцю – 99,94%). Через майже повну не-

розчинність свинцю і вісмуту у твердій міді ці евтектики з'являються у сплавах при будь-якому їх вмісті, і вони розташовуються по границям зерен міді. Вісмут утворює дуже тонкі прошарки між зернами міді. Товщина цих прошарків може досягати лише декількох атомних шарів. Тому зазвичай буває достатньо тисячних часток процента вісмуту, щоб такі прошарки утворились на значній частині міжзеренної поверхні. Свинець при малому його вмісті, як і вісмут, утворює по границях зерен міді тонкі легкоплавкі прошарки.

Домішки третьої групи (сірка і кисень) утворюють з міддю хімічні з'єднання  $\text{Cu}_2\text{S}$  (сульфід міді) та  $\text{Cu}_2\text{O}$  (закис міді) і також розташовуються по границях зерен міді у вигляді евтектик  $\text{Cu} - \text{Cu}_2\text{S}$  та  $\alpha(\text{Cu}) - \text{Cu}_2\text{O}$ . Основою евтектик в таких випадках є мідь, в якій містяться включення сульфідів або закису міді. При малому вмісті кисню евтектика утворює тонку лінію навкруги зерен міді. Зі збільшення вмісту кисню кількість евтектики збільшується і при вмісті 0,39%  $\text{O}_2$  сплав має тільки евтектичну будову.

Евтектика  $\alpha(\text{Cu}) - \text{Cu}_2\text{O}$  має точкову будову, основу евтектики складає мідь (твердий розчин кисню в міді). При переході за евтектичну точку (0,39 %  $\text{O}_2$ ) випадають первинні кристали закису міді, які мають форму дендритів. За кількістю евтектики в доевтектичному сплаві можна приблизно визначити вміст кисню у міді за формулою:

$$x = \frac{0,39 F_{\text{евт}}}{100} \%, \quad (1)$$

де  $F_{\text{евт}}$  – площа поля зору шліфа, яку займає евтектика, % (0,39 – вміст кисню у евтектиці).

При деформації міді порушується лита структура металу, і частки закису міді розташовуються по границях дуже витягнутих зерен, утворюючи рядкову структуру. При відпалі відбувається перебудова структури основного металу, і частки закису міді укрупнюються через їх злиття і розташовуються у вигляді ланцюжків усередині рекристалізованих зерен. Структура міді з домішками сірки схожа на сплави міді з киснем. Однак, у сплавах міді з сіркою спричиняється явище коалесценції, в результаті чого замість роздроблених виділень сульфідів спостерігається утворення великих накопичень у формі крапель і евтектика найчастіше не має характерної крапкової будови. Сульфід міді на нетравленому шліфі за своїм офарбленням нічим не відрізняється від закису міді і тільки застосування індикаторного травителя (3%  $\text{FeCl}_3$  в 10%  $\text{HCl}$ ) і поляризованого світла дозволяють відрізнити ці сполуки одну від одної.

Домішки, що утворюють з міддю легкоплавкі евтектики і крихкі хімічні сполуки, погіршують її механічні властивості і дуже знижують здатність міді до пластичної деформації

Кисень спричиняє так звану «водневу хворобу» міді. Це явище полягає в тому, що при нагріванні міді, яка містить кисень, у відновлюваній атмосфері (у середовищі газів  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  та ін.)

водень та інші гази, проникаючи в тверду мідь, взаємодіють з киснем, що міститься в ній і утворюють водяну пару (або  $\text{CO}_2$ ). Така пара не розчинюється в міді і намагається виділитися з неї під тиском. Через це в місцях виходу пари утворюються мікротріщини, які є причиною руйнування металу при наступній обробці тиском або в процесі роботи деталей, виготовлених з такої міді. З цієї причини до вмісту кисню в стандартах на мідь і мідні вироби ставляться жорсткі умови. Для розкислення міді зазвичай застосовують невеликі домішки фосфору (до 0,002 – 0,003 %).

Найбільш шкідливими домішками в міді та її сплавах є вісмут і свинець. Вони навіть при незначному вмісті дуже знижують механічні властивості міді при підвищених температурах. Внаслідок своєї крихкості вісмут сприяє зниженню пластичності і в холодному стані.

До останнього часу дуже шкідливою домішкою вважали також сурму, ототожнюючи її дію з поведінкою вісмуту в міді. Однак, це не досить обґрунтовано. Сурма, 2 % якої містить твердий розчин з міддю, не погіршує ні гарячої, ні холодної обробки міді.

Шкідливий вплив легкоплавких домішок можна усунути шляхом введення спеціальних присадок, які зв'язують ці домішки в тугоплавкі хімічні з'єднання. При виборі таких присадок в першому наближенні потрібно керуватись діаграмами стану, які характеризують взаємодію домішок з різними елементами. Найбільш ефективними є такі добавки, що утворюють з домішками хімічні сполуки, які кристалізуються при температурі, що вище температури гарячої обробки сплаву. Легкоплавкі з'єднання можуть сприяти гарячеламкості. Знаючи формули цих з'єднань, при відомому вмісті домішки можна приблизно підрахувати необхідну кількість нейтралізуючої присадки. Однак, при виборі присадок потрібно урахувати і те середовище, в якому відбувається утворення відповідних хімічних з'єднань. У багатьох випадках добавки, які вводяться, можуть хімічно взаємодіяти з іншими компонентами сплаву або утворювати з ними тверді розчини. При утворенні хімічних з'єднань або твердих розчинів дія таких добавок на домішки буде частково або повністю паралізуватися.

Для зв'язування свинцю і вісмуту найбільш ефективними присадками є: для вісмуту – літій, кальцій, церій, цирконій, магній; для свинцю – кальцій, церій і цирконій. При введенні зазначених добавок утворюються тугоплавкі з'єднання, які кристалізуються не у вигляді кристалічних прошарків, а у формі ізольованих кристалів.

Спроби оцінити вплив домішок на електропровідність міді зроблені авторами робіт [7, 8]. За даними роботи [9] кожен 0,005 % домішок дають додаткове збільшення електричного опору міді: кисень – 0,06 мкОм; свинець – 0,1 мкОм; залізо – 0,2 мкОм, сурма й нікель – по 0,15 мкОм; олово до 0,008 % на електричний опір практично не впливає, тому що повністю перебуває у вигляді оксидів, а окремі включення незначно знижують електропро-

відність міді. Згідно з даними авторів роботи [10], типовий вміст домішок у кисневмісній міді такий: залізо і нікель – до 0,02%; олово – до 0,03%; срібло – до 0,025%; свинець, цинк, фосфор, сурма, сірка – до 0,01% кожного; миш'як, вісмут, кадмій, селен – до 0,005% кожного.

Спроби легувати мідь з метою підвищення її механічних властивостей призводять до суттєвого зниження її електропровідності (табл. 1). Вадами наявних методів отримання литих сплавів, здатних зберігати високі показники механічних і теплоелектрофізичних властивостей при підвищених температурах, є обмежена верхня границя робочих температур, що зазвичай не перевищує  $0,6T_{\text{пл}}$ . Для міді це складає близько  $650^\circ\text{C}$ , що може бути істотно нижче, ніж температура зварювання більшості сплавів на основі заліза або міді. Тому проблема поліпшення спеціальних властивостей і експлуатаційних характеристик таких матеріалів є вкрай актуальною.

Одним із способів отримання зазначених матеріалів є зміцнення матриці, яка має високі тепло- і електропровідність, дисперсними включеннями, які формуються ще в рідкому стані у результаті емульгування розплаву. Для цього доцільно використовувати металічні системи на основі міді, діаграми стану яких характеризуються наявністю двофазної області розплаву та наявністю області незмішування в рідкому стані (монотектичні системи).

**Розв'язання задачі.** Якщо розглядати діаграму стану бінарної системи  $\text{Cu} - \text{Cr}$ , то можна визначити, що розплави цієї системи, в залежності від вмісту хрому, можуть існувати у формі двох рідких фаз, які різняться за будовою, із різними характеристиками взаємодії між іонами, що підтверджується великою різницею між величинами розрахункових значень енергії змішування та конфігураційної ентропії цих фаз. Але для розплавів системи  $\text{Cu} - \text{Cr}$  одночасне існування двох фаз термодинамічно неможливе, тобто концентраційна протяжність монотектичної ділянки лінії ліквідусу достатньо мала і нею можна знехтувати. Розширити її можна шляхом введення в систему додаткового елемента, енергія змішування атомів якого з атомами компонентів в одній із фаз має максимальну величину, а енергія змішування з атомами компонента, що є основою другої фази, мінімальна. Для системи  $\text{Cu} - \text{Cr}$  найбільш ефективною добавкою є вуглець. Наприклад, у розплавах на основі міді з добавками хромистого чавуну (1,4%  $\text{C}$ , 16%  $\text{Cr}$ ) при температурах, близьких до значення монотектичної температури системи, дисперсійне середовище являє собою розчин на основі міді з мінімальним вмістом розчинених елементів [11, 12].

Якщо досліджувати бінарні діаграми систем мідь – перехідні метали V групи ( $\text{V}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Ta}$ ), мідь – важкі аналоги хрому ( $\text{Mo}$ ,  $\text{W}$ ),  $\text{Cu} - \text{Fe}$  і мідь – важкі аналоги заліза ( $\text{Ru}$ ,  $\text{Os}$ ), а також  $\text{Ag} - \text{Cr}$  і  $\text{Ag} - \text{Fe}$  (срібло – важкий аналог міді), то легко визначити, що у таких системах термодинамічно можлива одночасна присутність двох рідких фаз (наявна область незмішування у рідкому стані). Систему  $\text{Cu} - \text{Fe}$  можна вважати умовно гомогенною в рідкому

стані. Таким чином, можна визначити перспективність використання як матеріалу для виготовлення електродів для контактного зварювання сплавів системи Cu + хромистий чавун. Структури зразків

із таких сплавів є мідною матрицею з дисперсними включеннями. Близька до сферичної форма включень може свідчити про наявність дисперсної зміцнюючої фази.

Таблиця 1 – Вплив змісту деяких хімічних елементів на фізико-механічні властивості міді

Хімічний елемент	Щільність при 20°C, $\cdot 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	Температура плавлення, °C	Розчинність у міді при 20°C, % по масі	Вплив елемента на властивості міді
Al	2,7	660	0,4	Збільшує жароміцність, знижує рідкотекучість
B	2,34	2300	0,06	У кількості 0,03 – 0,06 % модифікатор, розкислювач, підвищує рідкотекучість
Be	1,8	1284	0,2	Підвищує міцність, рідкотекучість, розкислювач
Ca	1,54	851	Не розчинний	Знижує рідкотекучість, розкислювач
Cd	8,65	321	< 0,05	Підвищує міцність, зносостійкість
Cr	7,19	1875	0,05	Підвищує міцність, жароміцність
Fe	7,87	1539	0,14	Підвищує міцність і жароміцність, зменшує вплив фосфору на електропровідність
Li	0,53	179	Не розчинний	Дегазатор і розкислювач, збільшує рідкотекучість, знижує корозійну стійкість
Mg	1,74	651	1,0	Підвищує жароміцність, розкислювач
Mn	7,44	1244	24	Підвищує міцність і жароміцність
P	1,8	44,2 білий	0,5	Знижує жароміцність й електропровідність, підвищує рідкотекучість і механічні властивості
Si	2,33	1410	2,0	Знижує розчинність газів, розкислювач
Zn	7,1	420	30	Розкислювач і дегазатор, підвищує міцність, корозійну стійкість, ливарні властивості
Zr	6,45	1852	1,1	Модифікатор (до 0,1 %), збільшує жароміцність і крихкість

Основна маса хрому і заліза знаходиться саме у включеннях зміцнюючої фази. Близькість температур фазових перетворень на термографічних кривих як нагрівання, так і охолодження сплавів на основі міді з добавками хромистого чавуну (1350°C – температура початку кристалізації чавуну, 1295°C – температура початку виділення карбіду (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, 1230°C – температура солідусу чавуну) до температур фазових переходів, характерних для Fe – Cr – C сплаву, який містить 16% Cr і 1,4% C, також свідчить про незначний вміст міді в дисперсних включеннях при температурах, близьких до температури початку кристалізації хромистого чавуну.

Ці дані дозволяють зробити висновок про близькість монотектичної температури сплаву, який аналізується, до температури ліквідусу хромистого чавуну, що вводиться як добавка.

Введення у мідь 5–8 % хромистого чавуну дозволяє отримати структуру з дрібнодисперсними (0,005–5 мкм) рівномірно розподіленими (з густиною розподілу  $(2,5-4) \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ ) включеннями (рис. 1), що забезпечує необхідний ступінь зміцнення мідної матриці. Формування дисперсних включень ще в рідкому стані, а також інтенсивне охолодження розплаву у формі і виливків у воді, дозволяють отримати дрібнозернисту основу з дрібнодисперсними рівномірно розподіленими включеннями. Це дозволяє виключити з технологічного процесу операції гартування, деформації і відпалу. Виключення трьох енергоємних операцій дозволяє

значно зменшити вартість виробів із розробленого сплаву порівняно з вартістю при їх виготовленні з хромистих бронз, що традиційно використовуються для цих цілей. Окрім того, скорочення тривалості плавки, зменшення вартості шихтових матеріалів також знижує вартість виливків.

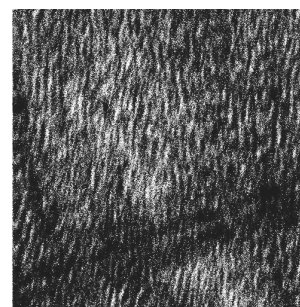


Рисунок 1 – Структура міді, легованої хромистим чавуном ( $\times 500$ )

Твердість міді, легованої хромистим чавуном, в литому стані знаходиться в межах 80–88 НВ, у той час як твердість заготовок із загартованої, деформованої і зістареної бронзи БРХ1 складає 79–82 НВ. Питома електропровідність сплаву знаходиться в межах  $4,76 \cdot 10^7 - 4,56 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , що складає 80–82% від електропровідності міді марки М1, у той час як електропровідність бронзи БРХ1 складає 72–77 %.

#### Висновки.

1. Підтверджено доцільність застосування металічних систем на основі сплавів міді з обмеже-

ною взаємною розчинністю компонентів у рідкому стані для отримання матеріалу для електродів контактних машин, здатних зберігати високі показники механічних та електрофізичних властивостей при підвищених температурах, у яких зміцнюючі дисперсні включення формуються безпосередньо у розплаві.

2. Твердість міді, легованої хромистим чавуном, у литому стані знаходиться у межах 80–88 НВ, а твердість заготовок із загартованої, деформованої і зістареної бронзи БРХ1 складає 79–82 НВ. Питомі електропровідність дослідного сплаву знаходиться у межах  $4,76 \cdot 10^7 - 4,56 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , що складає 80–82% від електропровідності міді марки М1, у той час як електропровідність бронзи БРХ1 складає 72–77%.

#### Список літератури

1. Иванова И. И., Крылова Н. А., Евлаш С. И. Дисперснотвердеющие порошковые бронзы для электродов контактной сварки. *Электрические контакты и электроды*. Киев: ИПМ НАН Украины. 2014. С. 97–101.
2. Шалунев Е. П., Смирнов В. М. Нанокмпозиционные материалы на основе порошковой меди для электродов точечной контактной сварки оцинкованных сталей. *Электрические контакты и электроды*. Киев: ИПМ НАН Украины. 2016. С. 3–12.
3. Веклич А. М., Фесенко С. О., Крячко Л. О., Борецький В. Ф., Клешич М. М., Головкова М. Є. Особливості електродугового розряду між композитними електродами Cu–C. *Електрические контакты и электроды*. К.: ИПМ НАН Украины. 2016. С. 36–60.
4. Ганесв Т. Р. Особливості дифузійної взаємодії міді та молібдену під час зварювання тиском. *Технічні науки та технології: науковий журнал*. Чернігів: Черніг. нац. технол. ун-т. 2015. № 2 (2). С. 55–61.
5. Власова О. В., Баглюк Г. А. Исследование условий спекания механоактивированных порошков на основе меди. *Электрические контакты и электроды*. Киев: ИПМ НАН Украины. 2014. С. 90–96.
6. Радченко О. К., Гельман О. І., Радченко Л. О., Іценко А. І., Кривошея В. О. Порівняльний аналіз властивостей порошків сплавів Cu–S та Cu–P пічного синтезу. *Сучасні проблеми фізичного матеріалознавства*. Київ: ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України. 2014. № 23. С. 208–214.
7. Смирятин А. П. *Промышленные цветные металлы и сплавы*. М.: Металлургия, 1976. 373 с.
8. Горшков И. Е. *Лите слитков цветных металлов и сплавов*. М.: Металлургиздат, 1952. 416 с.
9. Мальцев М. В. *Металлография цветных металлов и сплавов*. М.: Металлургия, 1976. 125 с.
10. Христенко В. В., Кириевский Б. А. О взаимной растворимости и образовании области несмешивания металлов в жидком состоянии. *Металлы и лите Украины*. 1999. № 1–2. С. 12–15.
11. Христенко В. В., Кириевский Б. А. Расчет параметров уравнений равновесия между жидкими фазами в системах с областью несмешиваемости в жидком состоянии. *Процессы литея*. 2000. № 1. С. 3–9.
12. Бредихин В. Н., Маняк Н. А., Кафтаненко А. Я. *Медь вторичная*. Донецк: ДонНТУ. 2006. 416 с.

#### References (transliterated)

1. Ivanova I. I., Krylova N. A., Evlash S. I. Dispersnotverdejushhie poroshkovye bronzy dlja jelektrodov kontaktnoj svarki [Dispersion hardening powder bronze for resistance welding electrodes]. *Elektricheskie kontakty i elektrody*. Kiev, IPM NAN Ukrainy Publ., 2014. pp. 97–101.
2. Shalunov E. P., Smimov V. M. Nanokompozicionnye materialy na osnove poroshkovoj medi dlja jelektrodov tochechnoj kontaktnoj svarki ocinkovannyh stalej [Nanocomposite materials based on powdered copper for electrodes of spot contact welding of galvanized steels]. *Elektricheskie kontakty i elektrody*. Kiev, IPM NAN Ukrainy Publ., 2016. pp. 3–12.
3. Veklych A. M., Fesenko S. O., Kriyachko L. O., Borecz'kyj V. F., Kleshych M. M., Golovkova M. Ye. Osobly'vosti elektrodugovogo rozryadu mizh kompozitny'my' elektrodami' Cu–C [Features of electric arc discharge between Cu–C composite electrodes]. *Elektricheskie kontakty i elektrody*. Kiev, IPM NAN Ukrainy Publ., 2016. pp. 36–60.
4. Ganeyev T. R. Osobly'vosti dy'fuzijnoy vzayemodiyi midi ta molibdeny pid chas zvaryuvannya ty'skom [Features of copper and molybdenum diffusion during pressure welding]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologiyi*. Chemig. nath. technol. un-t. 2015, no 2 (2), pp. 55–61.
5. Vlasova O. V., Bagljuk G. A. Issledovanie uslovij spekanija mehanooaktivirovannyh poroshkov na osnove medi [Study of sintering conditions for mechanically activated copper-based powders]. *Elektricheskie kontakty i elektrody*. Kiev, IPM NAN Ukrainy Publ., 2014. pp. 90–96.
6. Radchenko O. K., Get'man O. I., Radchenko L. O., Icenko A. I., Kryvosheya V. O. Porivnyal'ny'j analiz vlasty'vostej poroshkiv spлавiv Cu–S ta Cu–P pichnogo sy'ntezu [Comparative analysis of the properties of alloys of Cu–S and Cu–P fusion syntheses]. *Suchasni problemy' fizychnogo materialoznavstva*. Ky'viv, IPM im. I. M. Francevy'cha NAN Ukrainy'. 2014, no. 23, pp. 208–214.
7. Smirjagin A. P. *Promyshlennyye cvetnyye metally i splavy* [Industrial non-ferrous metals and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1976. 373 p.
8. Gorshkov I. E. *Lite slitkov cvetnyh metallov i splavov* [Casting ingots of non-ferrous metals and alloys]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1952. 416 p.
9. Mal'cev M. V. *Metallografiya cvetnyh metallov i splavov* [Metallography of non-ferrous metals and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1976. 125 p.
10. Hristenko V. V., Kirievskij B. A. O vzaimnoj rastvorimosti i obrazovanii oblasti nesmeshivaniya metallov v zhidkom sostojanii [On mutual solubility and the formation of the region of metal mixing in the liquid state]. *Metall i lite Ukrainy*. 1999, no. 1–2, pp. 12–15.
11. Hristenko V. V., Kirievskij B. A. Raschet parametrov uravnenij ravновесия mezhdz zhidkimi fazami v sistemah s oblast'ju nesmeshivaemosti v zhidkom sostojanii [Calculation of parameters of equilibrium equations between liquid phases in systems with a region of immiscibility in a liquid state]. *Processy lit'ja*. 2000, no. 1, pp. 3–9.
12. Bredihin V. N., Manjak N. A., Kaftanenko A. Ja. *Med' vtorichnaja* [Secondary copper]. Donetsk, DonNTU Publ., 2006. 416 p.

Надійшла (received) 22.07.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Крахмальов Олександр Вікторович (Krakhmalov Aleksandr Viktorovich, Krakhmalyov Oleksandr)** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Зварювання», ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3338-9724>; e-mail: [krakhmalyov1@gmail.com](mailto:krakhmalyov1@gmail.com)

**Зінченко Олена Іванівна (Zinchenko Elena Ivanovna, Zinchenko Olena)** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2961-5861>; e-mail: [zinchenko.zinchenko@gmail.com](mailto:zinchenko.zinchenko@gmail.com)

**Кротенко Галина Анатоліївна (Krotenko Galina Anatolievna, Krotenko Galina)** – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3523-7350>; e-mail: [krotenko.galina@gmail.com](mailto:krotenko.galina@gmail.com)